УДК 621.865.8-83

Н.Ф. КАРНАУХОВ, М.Н. ФИЛИМОНОВ, Ю.В. ПУДОВА

ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА В РЕЖИМЕ ДВУХТОКОВОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

Предложен метод уменьшения амплитуды колебаний звена подвижности (руки) промышленного робота, захватного устройства в режиме позиционирования. Особенностью метода является использование двухтокового динамического торможения асинхронного двигателя, работающего по схеме «АИН-АД» в режиме частотного управления. Программное формирование тормозного момента на валу асинхронного двигателя посредством взаимного поворота векторов магнитного поля статора и ротора с учетом амплитуды и фазы колебаний звена подвижности промышленного робота позволяет создать условия демпфирования и повысить точность позиционирования ЗУ при выполнении транспортных и технологических операций.

***Ключевые слова**: захватное устройство, амплитуда и фаза колебаний, двухтоковое динамическое торможение, асинхронный двигатель, электромеханическая система, «ползучая скорость», датчики, точность позиционирования.*

Введение. При частотном управлении скоростью асинхронного двигателя (АД) электромеханической системы (ЭМС), в частности, звеном подвижности захватного устройства (ЗУ) промышленного робота (ПР), эффективность работы последнего зависит от ряда факторов. К важнейшим из них следует отнести такой параметр, как точность позиционирования, определяющая возможности ПР при выполнении транспортных и технологических операций. Понятие точности в дискретных технологических процессах, выполняемых ПР с позиционной системой управления, связано с конечным положением рабочего органа (РО) или ЗУ и характеризуется погрешностью позиционирования РО. Процессы с непрерывными технологическими циклами связаны с применением контурных систем управления, если ставится задача по воспроизведению траектории движения РО. Рассматриваемые погрешности (позиционирования и отработки траектории РО) являются зависимыми параметрами от кинематических ошибок и передач отдельных степеней подвижности ПР. Поскольку ПР работают при больших скоростях и повышенных динамических нагрузках звеньев, появление деформаций несущих конструкций и неравномерность вращения ротора АД (при пониженной скорости перемещения звена подвижности к точке позиционирования), вызывают вибрации и колебания ЗУ. Известно [1,2], что при проектировании таких роботов появляется противоречие между быстродействием и точностью позиционирования, исключить которое достаточно сложно. По мнению авторов, влияние вибрации и колебаний на позиционирование ЗУ можно уменьшить, если ввести управляемое формирование момента торможения и ограничение амплитуды колебаний захватного ЗУ при выходе его в точку позиционирования. В этом случае можно использовать некоторые особенности работы частотно-управляемой системы «АИН-АД» [1], когда задача решается программно в процессе регулирования скорости АД, работающего в зонах пониженных и «ползучих» скоростей движения

исполнительного механизма (ИМ) электромеханической системы (ЭМС).

Предлагаемое решение прошло экспериментальную проверку [3] и подтвердило основные положения метода.

Постановка задачи. Для повышения точности позиционирования РО, в частности, ЗУ ПР необходимо предложить метод демпфирования колебаний выходного звена подвижности (руки) с консольным креплением в направляющей цилиндрической системы координат ПР «Электроника НЦТМ-01» (рис.1). Исследования по повышению точности позиционирования ЗУ проводятся с использованием управляемого процесса двухтокового динамического торможения АД, работающего по схеме «АИН-АД» [4].

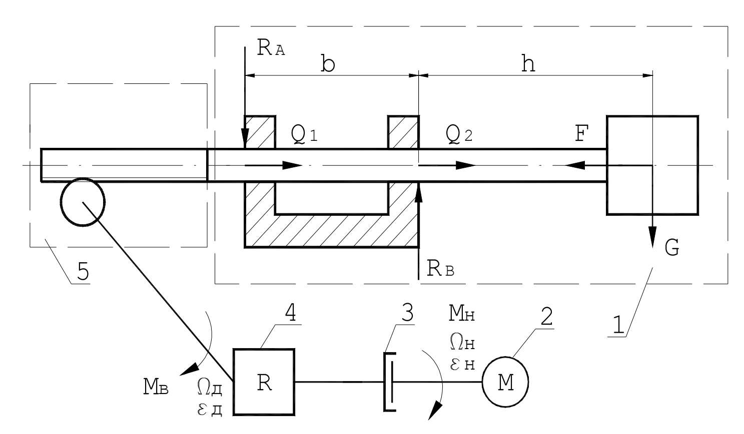


Рис.1. Кинематическая схема звена подвижности ПР: 1 – исполнительный механизм (конструкция руки робота и направляющих звена подвижности); 2 – исполнительный двигатель; 3 – муфта; 4 – редуктор; 5 – реечная пара

При анализе расчетной схемы (рис.2) предполагается равномерное распределение массы руки робота, а масса ЗУ и транспортируемого груза сосредоточены в одной точке. Принятые условия позволяют записать выражение для веса степени подвижности с объектом манипулирования:

$$G = (m + M_{С.П.}) \cdot g, \qquad (1)$$

где m, $M_{С.П.}$ – масса груза и руки робота (степени подвижности), g – ускорение свободного падения.

а)

б)

Рис.2. Расчетная схема взаимодействующих усилий в направляющих звена подвижности ПР

Расчетная схема руки манипулятора с одинарной направляющей (рис.2,б) выполнена в предположении равномерного распределения массы руки по длине звена подвижности, что позволяет записать:

$$q = \frac{M_{С.П.} \cdot g}{a + l}, \tag{2}$$

где a – вылет консоли направляющей (ход объекта манипулирования); l – расстояние между опорами. Если учесть диаметр направляющей d и коэффициент трения f между направляющей и втулкой, то неизвестные реакции в опорах R_A и R_B могут быть определены из условия равенства нулю изгибающих моментов относительно точек А и В, а моменты трения в опорах записаны в виде:

$$M_1 = f \cdot d \cdot R_A; \quad M_2 = f \cdot d \cdot R_B. \tag{3}$$

С учетом выражений (1), (2) и (3) реакции опор А и В можно определить по соотношениям [5]:

$$R_A = \frac{2 \cdot G \cdot (a - f \cdot d) - q \cdot (l^2 - a^2) - 2 \cdot q \cdot f \cdot d \cdot (l + a)}{2 \cdot l}; \tag{4}$$

$$R_B = G \cdot (l + a - f \cdot d) + q \cdot (l + a) \cdot \left(\frac{l + a}{2} - f \cdot d \right). \tag{5}$$

Для поиска деформации руки робота по оси X в точке А (рис. 2,б) используется интеграл Мора [5], что позволяет определить перемещение ЗУ под действием приложенных нагрузок из выражения

$$x = -G \;\; k_1 - q \;\; k_2, \tag{6}$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты при сосредоточенной и распределенной нагрузках соответственно составят

$$\mathrm{k}_1 = \frac{a^3}{6 \;\; E \;\; j} \;\; 2 \;\; \frac{l}{a} + 1 \;\; - \frac{f \;\; d}{a} \;\; \frac{l}{a} + 3 \;\; (1 - f) \;\;, \tag{7}$$

$$k_2 = \frac{a^4}{24 \cdot E \cdot j} \cdot \left[2 \cdot f \cdot \frac{d}{a} \cdot \left(\frac{l^2}{a^2} - \left(3 + 2 \cdot \frac{l}{a} \right) + 6 \cdot f \cdot d \cdot \left(\frac{l}{a} + 1 \right) \right) + \left(3 + 4 \cdot \frac{l}{a} - \frac{l^3}{a^3} \right) \right] . \tag{8}$$

Если под сосредоточенной силой G (см.рис.2) принять алгебраическую сумму силы тяжести и силы инерции

$$G = -m\ddot{x} - m \;\; g, \tag{9}$$

то для перехода к рассмотрению динамики центра масс ЗУ ось направляют в сторону действия силы тяжести (по оси X), и после некоторых подстановок и преобразований можно записать неоднородное дифференциальное уравнение стандартного вида:

$$\ddot{x} + k_1^2 \;\; x = G, \tag{10}$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{1}{m \;\; k_{11}}}, \text{ и } G = g + q \;\; \frac{k_{21}}{k_{11}}, \tag{11}$$

где k_{11}, k_{21} – коэффициенты различия направления силы трения при четных и нечетных колебаниях ЗУ.

Уравнение (10) представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка. Для расчета сил реакций в опорах и анализа динамики движения руки ПР (манипулятора), построения зависимостей колебаний ЗУ в точке позиционирования D выполнены необходимые расчеты и проведено моделирование. В результате моделирования были получены графические зависимости колебаний ЗУ в точке позиционирования (рис.3) при различных массах нагружения.

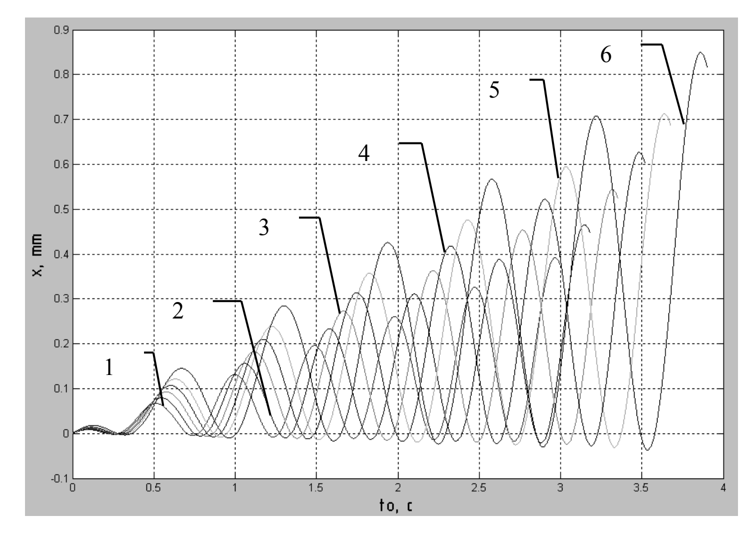
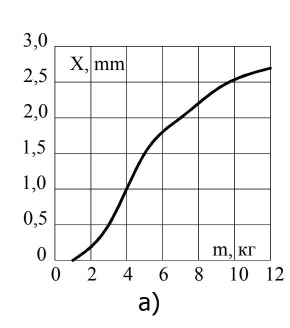
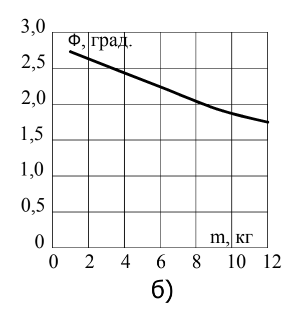


Рис.3. Графики колебаний ЗУ манипулятора
в точке позиционирования при различной нагрузке:
1 – 1 кг; 2 – 3 кг; 3 – 5 кг; 4 – 7 кг; 5 – 9 кг; 6 – 12 кг

На основе полученных колебаний, отличающихся амплитудой, фазой и периодом колебаний, построены взаимные зависимости: амплитуды колебаний (рис.4,а) и фазы колебаний (рис.4,б) от массы; амплитуды колебания от фазы (рис. 4,в).





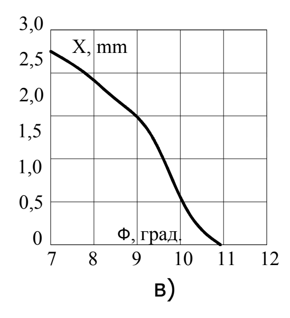


Рис.4. Взаимные зависимости колебаний: амплитуды от массы (а),
фазы колебаний от массы (б) и амплитуды колебаний от фазы (в)

Решение задачи по снижению колебаний ЗУ в процессе работы ПР, по предложению авторов, возможно с использованием принципа «двухтокового» динамического торможения АД [4], когда управление ЭМС осуществляется по схеме «АИН-АД» и программно (по разработанному алгоритму), а вектор магнитного потока статора АД может формироваться с углом отставания или опережения относительно ротора. Неравномерность вращения (перемещения) РО машины, включающей механизмы с постоянным передаточным отношением (зубчатых, шестерня - рейка и др.), зависит не только от соотношения сил движущих и сил технологического сопротивления, но и от фактора появления пульсирующего момента вращения на валу АД в зоне «низких и ползучих скоростей» [2] перемещения ИМ при гармонических составляющих тока статора.

Математическая модель объекта управления. С учетом реально существующих звеньев ИМ кинематическую схему (см.рис.1) можно рассматривать как классическую схему двухмассовой модели звена подвижности ПР (рис.5) с электромеханическим преобразователем (с двумя вращающимися инерционными элементами J_1 и J_2), связанными упругим звеном с жесткостью *C12*.

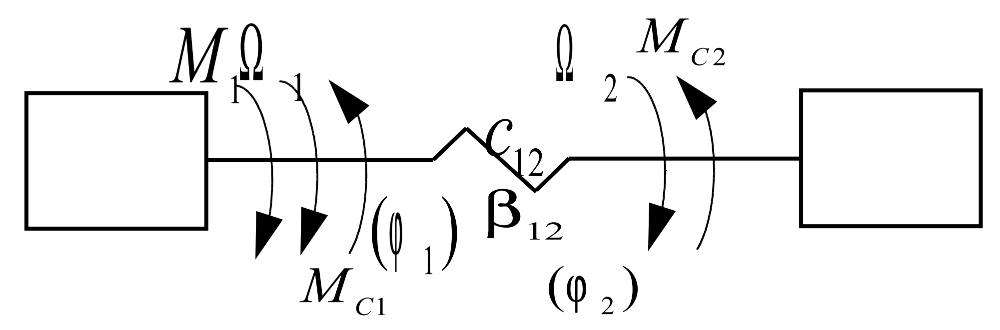


Рис.5. Двухмассовая модель звена подвижности ПР с электромеханическим преобразователем

Математическая модель составлена для упрощенного варианта, когда двухмассовая модель приведена к эквивалентной одномассовой модели, что позволяет записать для АД следующую систему уравнений:



;

$$J_1 \cdot \Omega'_1 = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_{12} \cdot (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) - M_{12} - M_{C1} - M_T;$$

$$J_2 \cdot \Omega'_2 = M_{12} - M_{C2};$$

$$M_{12} = c_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + \beta_{12} \cdot (\Omega_1 - \Omega_2);$$

$$\varphi'_1 = \Omega_1;\ \varphi'_2 = \Omega_2;\ \Delta\alpha' = k_S \cdot \Omega_2, \qquad (12)$$

где $u_{1\alpha} = U_H \cdot \gamma \cdot cos(\alpha \cdot t)$; $u_{2\beta} = U_H \cdot \gamma \cdot sin(\alpha \cdot t)$; $L_1 = L_{12} + L_{\sigma 1}$;

$$L_2 = L_{12} + L_{\sigma 2};\ b = \frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2};\ c = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2};\ d = \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}.$$

Однако уравнения (12) не учитывают изменений в динамическом моменте на валу АД, возникающих при подаче постоянного тока управления в обмотки статора АД. Упрощенно указанное влияние можно ввести в математическую модель, дополнив ее уравнениями, в которых отражен

фактор влияния изменяющихся параметров, включенных в указанные зависимости:

$$M_T = \frac{3{I_П}^2 L_{12}^2 \Omega_1^2 r_2'}{(1-s)\Omega_H\left[\left(\frac{r_2'}{1-s}\right)^2 + \left(L_{12}\Omega_1 + r_2'\right)^2\right]}, \qquad (13)$$

$$I_П = \frac{1}{\sqrt{3 r_2' L_{12}\Omega_1}}\sqrt{\frac{3U_H r_2'(1-s)\left[\left(\frac{r_2'}{1-s}\right)^2 + \left(L_{12}\Omega_1 + r_2'\right)^2\right]}{s\left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + \left(r_1 + r_2'\right)^2\right]} - \left(M_{12} + M_{C1}\right)(1-s)\Omega_H\left[\left(\frac{r_2'}{1-s}\right)^2 + \left(L_{12}\Omega_1 + r_2'\right)^2\right]}. \qquad (14)$$

В уравнения (12)-(14) введены следующие обозначения: $i_{1\alpha}$, $i_{2\alpha}$, $i_{1\beta}$, $i_{2\beta}$ – токи в обмотках статора и ротора по координатным осям α и β; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ – напряжения на обмотках статора по осям α и β; r_1, r_2' – активное сопротивление ротора и статора соответственно; L_1, L_2, L_{12} – индуктивности статора и ротора и взаимная индуктивность; $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; p – число пар полюсов статора АД; U_H, γ, α – действующее и относительное значения, частота входного напряжения; c_{12}, β_{12} – коэффициент жесткости и сопротивления между массами ведущего и ведомого вала; $\Delta\alpha$, k_S – перемещение и коэффициент пересчета (усиления) выходного звена по пути; M_{12} – момент упругого взаимодействия; M_{C1}, M_{C2} – момент трения на валу АД и статический момент нагружения выходного вала; J_1, J_2 – моменты инерции ведущего и ведомого валов ИМ; φ_1, φ_2 – углы деформации, Ω_1, Ω_2 – скорости ведущего и ведомого валов ИМ; Ω_H – угловая скорость вращения поля статора; M_T – тормозной момент, обусловленный протеканием постоянной составляющей тока статора в режиме двухтокового динамического торможения; $I_П$ – постоянная составляющая тока статора в режиме двухтокового динамического торможения; s – скольжение.

Для уменьшения неравномерности вращения вала АД в [1,2] предложены специальные режимы работы АИН, обеспечивающие формирование выходной частоты тока фаз статора синусоидальной формы от 0,1 Гц и выше. Сохранение «синусоидальности» формы токов фаз статора АД в широком диапазоне позволяет избежать пульсирующих моментов на валу

АД и уменьшить колебания ЗУ от влияния внешних сил, что должно соблюдаться при осуществлении режима двухтокового динамического торможения АД.

Двухтоковое динамическое торможение АД. Эффект возникновения на валу тормозного момента при питании статора постоянным током [6] позволяет совместить частотный и динамический режимы торможения при одновременном управлении переменным и постоянным токами в обмотках статора. При этом формируются расчетные динамические моменты на валу АД в режиме торможения и исключаются возможные удары в механической части ЭМС [7]. Такая система управления АД позволяет (по сигналам датчиков контролируемых величин) в соответствии с приведенными зависимостями (рис. 4) формировать целесообразное торможение звена подвижности в режиме демпфирования колебаний амплитуды ЗУ на определенном уровне (от 0,2 до 0,7 мм), зависимых от чувствительности датчиков и усиления сигналов в СУ. В общем случае процесс торможения АД можно рассматривать как результат взаимодействия эквивалентного двигательного и тормозного моментов, обеспечиваемых равенством намагничивающих сил (н.с.) постоянного тока подмагничивания статора [7,9] и приведенного переменного тока ротора. В этом случае результирующий момент на валу АД в режиме управляемого динамического торможения можно представить в виде алгебраической суммы действующих моментов в зависимости от уровня скорости (Ω), скольжения (s) по уравнению, т.е.

$$M = \frac{3 \cdot U_H^2 \cdot r_2'}{s \cdot \Omega_H \cdot \left(\left(\frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(L_1 \Omega_1 + L_2 \Omega_1 \right)^2 \right)} + \frac{-3 \cdot I_П^2 \cdot L_{12}^2 \Omega_1^2 \cdot r_2'}{(1-s) \cdot \Omega_H \cdot \left(\left(\frac{r_2'}{1-s} \right)^2 + \left(L_{12} \Omega_1 + r_2' \right)^2 \right)} . \quad (15)$$

На рис.6 построены качественные характеристики раздельного и совместного процессов динамического торможения системы «АИН-АД» при параметрическом способе регулирования скорости АД серии 4АА50А2УЗ мощностью 90 Вт, $\Omega_н$ = 314 рад/с.

На приведенных характеристиках обозначены: a_0 – изображающая точка на естественной характеристике 1 двигательного режима работы АД при скорости Ω=28 рад/с; a_1, a_2, a_3 – изображающие точки на совместных механических характеристиках соответственно C_1, C_2, C_3, полученных с учетом характеристик 2,3,4 для скорости Ω=28 рад/с при разных токах подмагничивания; a_1 – изображающая точка совокупной характеристики, рассчитанная для скорости Ω=28 рад/с при токе подмагничивания $I_П$=0,05-0,25 А. Построение совместных механических характеристик C_1-C_3 сопряжено с рядом трудностей, обусловленных различием используемых электротехнических сталей магнитной системы [7,8] и достаточно сложными зависимостями между активными, индуктивными составляющими параметров АД при насыщении сердечников статора и ротора в зоне пониженных скоростей работы АД [1,2]. Ранее применяемая горячекатаная изотропная электротехническая сталь (1212 (Э12), 1312 (Э22), 1412(Э32) по ГОСТ 21427.3) в настоящее время в производстве электрических машин заменена холоднокатаной изотропной электротехнической сталью (2011, 2312, 2411, а также 2211, 2212, 2311,2412 по ГОСТ 21427.2 – 83). Вследствие высокой магнитной проницаемости указанной стали, пониженных удельных потерь при перемагничивании, малой разнотолщинности

и разноплоскостности структуры расчетные параметры АД необходимо соответственно корректировать. Применение указанных сталей в электромашиностроении позволяет повысить магнитные нагрузки, в частности, по напряженности (*H*, А/см) в 1,5 -2 раза.

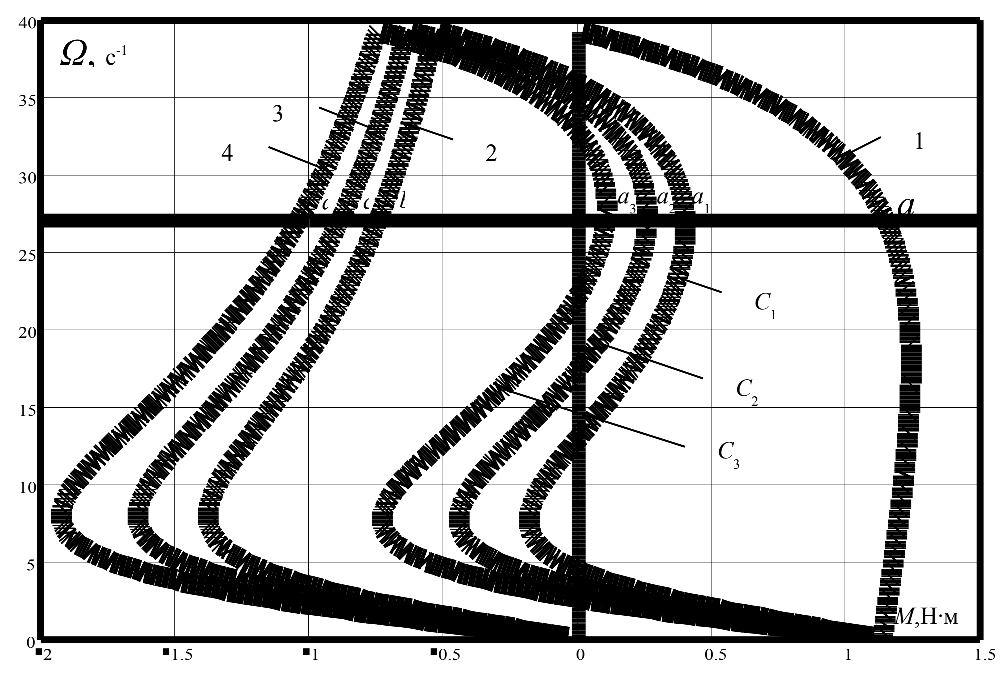


Рис.6. Траектории движения изображающих точек на механических характеристиках АД: 1 – естественная; 2,3,4 – динамического торможения; C_1, C_2, C_3 – совместные в режиме «двухтокового» динамического торможения

Результаты моделирования системы с дополненными уравнениями, отражающими фактор влияния изменяющихся параметров АД при введении контура подмагничивания током $I_П$, получены с использованием схемы объекта исследования, разработанной в Simulink (MatLab 6.5.) и дополненной специальными блоками [9]. Параметры АД (серии 4АА50А2У3, мощностью 90 Вт) использовались в качестве параметров блока Asynchronous Machine. При этом движение изображающей точки 1 (рис. 6), расположенной на механической характеристике Д1 (двигательного режима) в точке установившейся скорости движения ИМ, соответствует соотношению $M_Н = M_С$ при скорости вращения вала $Ω_В=Ω_Н$. Режим торможения начинается с плавного понижения напряжения U_1 и f_1 согласно принятому закону $U_1/f_1=const$ для исключения динамических ударов в приводной системе и исполнительном механизме.

В режиме «мягкого» торможения электропривода (от точки 1 до точки 2) при частотном управлении скорость вращения АД изменяется с сохранением момента $M_Н$. Введение в точке 2 механической характеристики $Ω=f(M)$ режима динамического торможения состояние АД соответствует двухтоковому торможению с плавным формированием тормозного момента $–M_{T1}$ и снижению скорости от точки 2 до точки 4 по кривой *T1*. Участок характеристики 2-3-4 (рис.7) имеет плавные переходы изменения скорости, обусловленные постоянной времени нарастания постоянного тока в об-

мотке управления. В дальнейшем изменение скорости реализуется при постоянном тормозном моменте $-M_{T1}$ (постоянном ускорении торможения $-\varepsilon_T$) от точки 4 до 4′, что соответствует изменению скорости при постоянном тормозном моменте. На участке изменения скорости (точки 4′ – 5) характеристики изменяется режим работы АИН таким образом, что на «ползучей» скорости развивается момент вращения на валу АД, а тормозной момент при уменьшении тока подмагничивания $I_П$ уменьшается и АД работает под активным моментом на валу, снижая скорость от точки 5 до точки 7. Затем из точки 7 до точки 8 двигательного режима АД скорость снижается до полной остановки приводной системы промышленного робота при программном формировании вектора магнитного поля статора (за счет изменения алгоритма работы АИН) с отставанием на 1-2 электрических градуса от вектора магнитного потока поля ротора.

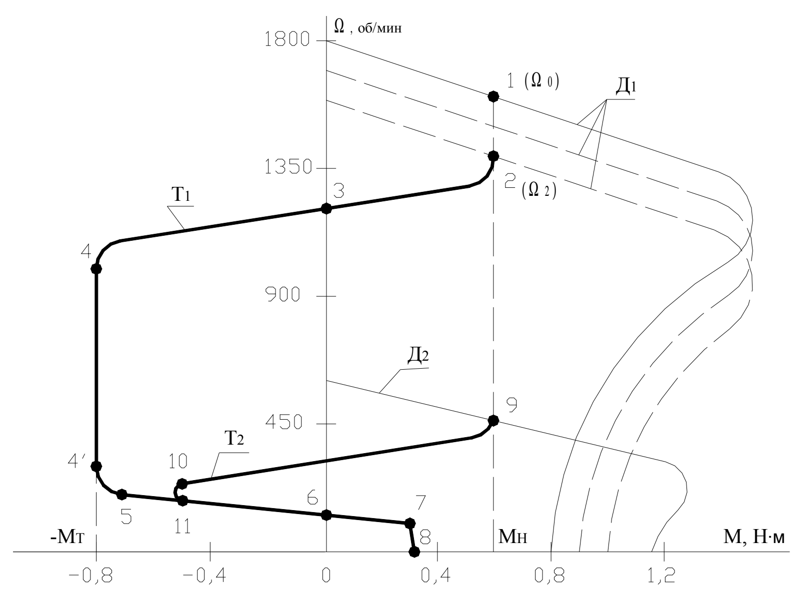


Рис. 7. Механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя:
Д, Т – двигательный и тормозной режимы работы АД

При этом для обеспечения постоянства тормозного момента, ускорения торможения (участок 4-4') регулирование величины постоянной составляющей тока статора находится в зависимости от текущих значений частоты f и напряжения U питания АД от АИН, угловой скорости вращения ротора Ω и момента на валу АД по принятому закону. Так как данный принцип торможения позволяет поддерживать постоянным ускорение, появляется возможность точной остановки позиционного привода промышленного робота в заданной точке.

Моделирование. При моделировании АД ротор машины замыкается накоротко, статор питается от АИН с ШИМ-модуляцией (рис. 8). Основная частота синусоидального напряжения изменяется от 0 до 60 Гц, а несущая частота имеет треугольную форму и равна 1980 Гц. Согласно рекомендациям [9,10], коэффициент частотной модуляции mf должен быть нечетным и кратным трем, т.е. mf = 33, что обеспечивает установленную несущую частоту 60x33=1980 Гц.

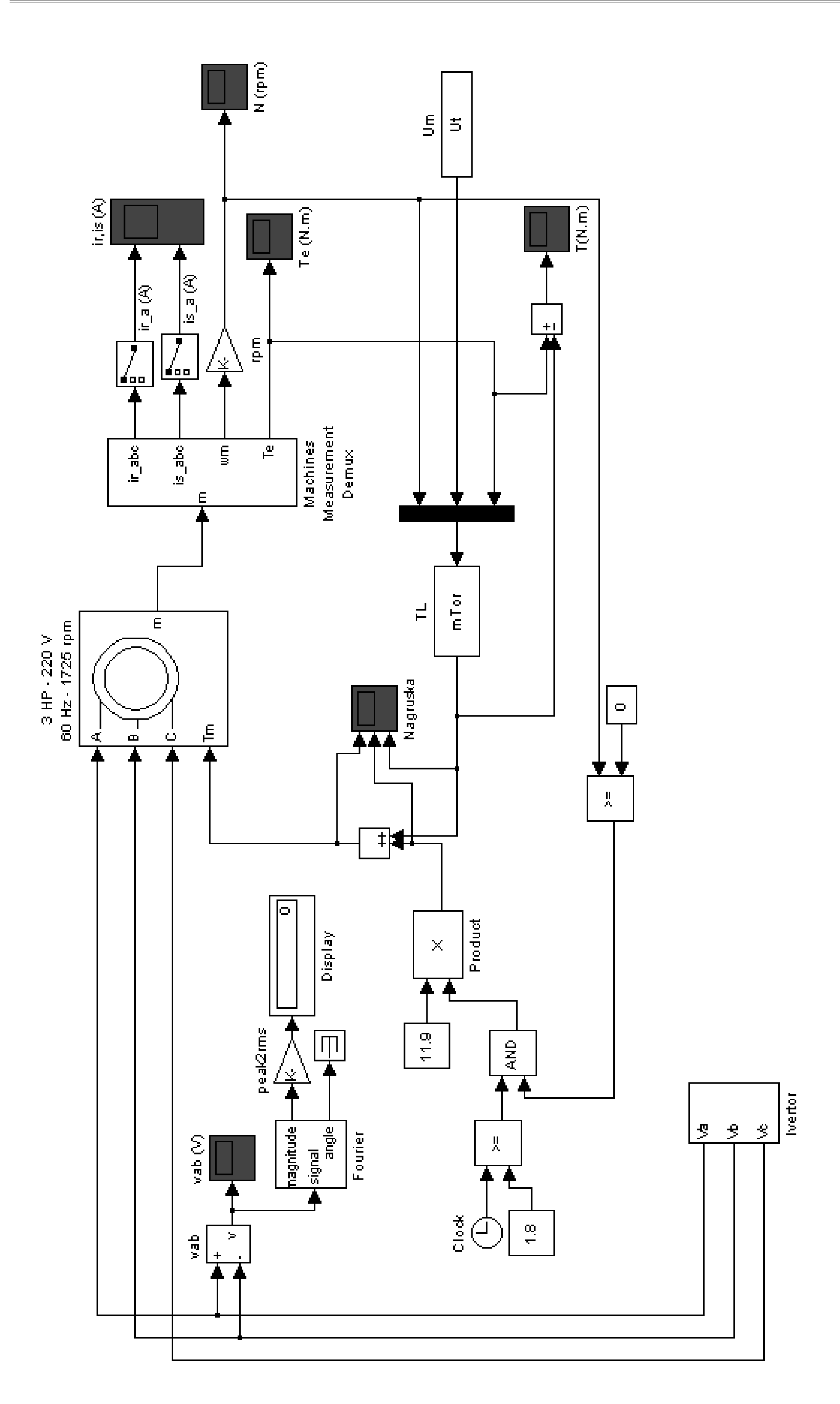


Рис. 8. Схема объекта исследования в Simulink (MatLab 6.5.)

Паспортные данные асинхронного двигателя 4АА50А2У3 используются в качестве параметров блока Asynchronous Machine, электромагнитный момент торможения от постоянного тока управления задается с помощью блока TL, который построен как S-function по уравнениям (13) и (14) и подается на вход Tm блока асинхронного двигателя (Asynchronous Machine) в расчетный момент времени.

Результаты моделирования. При запуске математической модели в Simulink моделирование подтвердило ожидаемые результаты по характерному изменению параметров скорости (рис.9) при пуске и торможении АД, а также соответствие формируемых моментов (рис.10) в процессе пуска и реализации двухтокового динамического торможения. Изменения скорости при торможении (точки 1-8, рис.9) соответствуют характеру формирования кривой (T1) при динамическом торможении и полностью совпадают с ранее приведенными пояснениями (см.рис.7). Здесь участок 4-4′ характеристики $\Omega = f(-M_T)$ имеет достаточный диапазон изменения скорости (Ω) при изменении тормозного момента не более 5-10% от установленного программно при торможении, что позволяет производить торможение привода ПР (ЭМС) с постоянным ускорением торможения, без ударов в кинематической схеме передаточного механизма. На участке 4′-7 имеет место плавное снижение скорости движения ЗУ (руки ПР), когда АД из режима тормозного переходит в двигательный режим, формируя зону «ползучей» скорости движения ЗУ. При этом ЗУ перемещается с пониженной скоростью до полной остановки в точке позиционирования (участок 7-8), а управляемое «подтормаживание» АД в противофазе колебаниям ЗУ снижает амплитуду последних и способствует повышению точности позиционирования. При программном формировании управляемых динамических режимов ПР особую значимость имеет экспериментальное определение диапазона изменения тока подмагничивания статора постоянным током, исходя из условий желаемого демпфирования колебаний ЗУ при позиционировании.

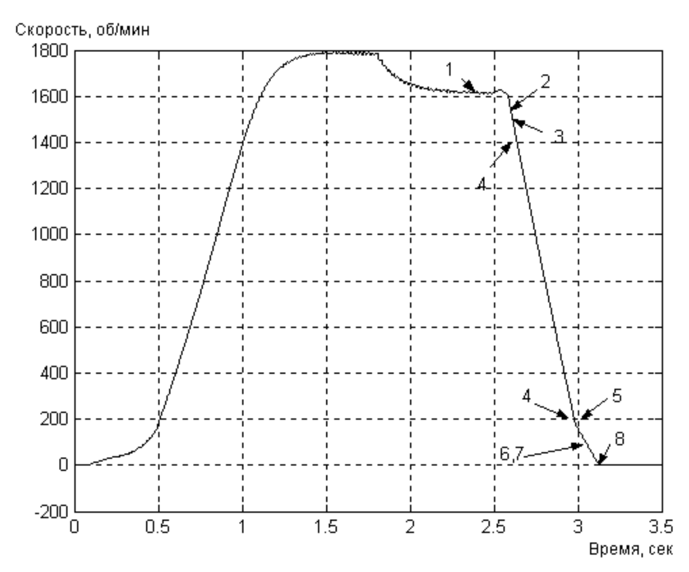


Рис. 9. Изменение скорости при разгоне и динамическом торможении АД

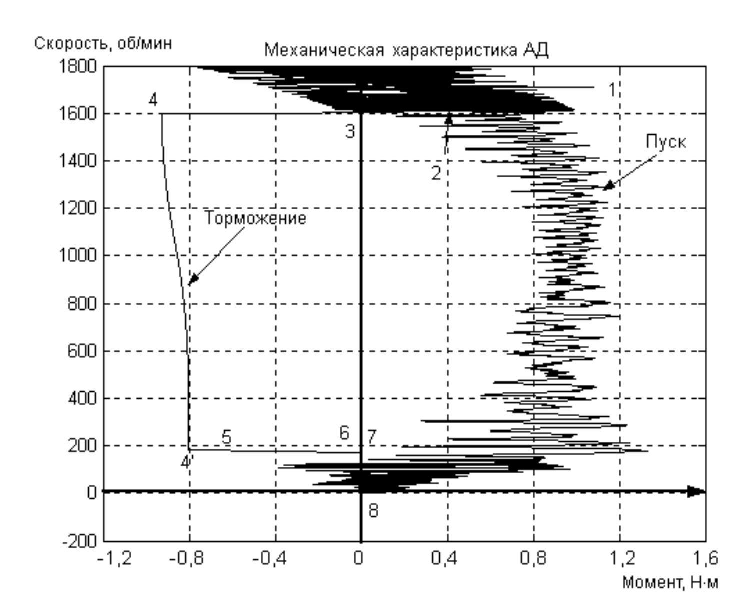


Рис.10. Результаты моделирования
пускового и тормозного моментов

Выводы. Метод управляемого двухтокового динамического торможения перспективен для широкого применения в системах частотного управления АД электроприводов ПР, позволяет программно управлять формированием уровня и фазой включения тормозного момента (в противофазе колебаниям руки ПР) с целью демпфирования колебаний звена подвижности ЗУ. Поскольку амплитуда и фаза колебаний являются зависимыми параметрами от масс и моментов инерции подвижных звеньев ПР, то момент формирования режима «подтормаживания» на низких и «ползучих» скоростях движения ЗУ должен осуществляться с учетом чувствительности датчиков контроля указанных параметров.

Библиографический список

1. Карнаухов Н.Ф. Асинхронный привод механизмов малых перемещений / Н.Ф. Карнаухов, М.Н. Филимонов, С.А. Ушаков // Новые технологии управления движением технических объектов: мат. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. – Ростов н/Д: Издательство СКНЦ ВШ, 2001. – 133 с.

2. Карнаухов Н.Ф. Энергетические показатели электропривода при частотном способе управления асинхронным двигателем / Н.Ф. Карнаухов, В.А. Прус, М.Н. Филимонов // Динамика технологических систем: тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. – Т.III. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 219 с.

3. Карнаухов Н.Ф., Филимонов М.Н., Ушаков С.А. Установка для демонстрации рекламно-информационного материала и устройство управления перемещением носителя. Патент на полезную модель. № 36914 РФ, МПК^7 G 09 F 13/00 H 02 P-7/36. – Опубл. в БИ, 2004. – № 9.

4. Карнаухов Н.Ф. Особенности формирования двухтокового динамического торможения асинхронного двигателя мехатроннной системы при частотном управлении / Н.Ф. Карнаухов, М.Н. Филимонов, Н.В. Деркачев // Мехатроника – 2008: мат. IV Междунар. науч.-практ. студ. коллоквиума, 18-20 июня / ЮРГТУ. – Новочеркасск, 2008. – С. 17-20.

5. Робототехнические системы в сборочном производстве; под ред. Е.В.Пашкова. – Киев: Вища школа, 1987. – 272 с.

6. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.

7. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А.Д. Поздеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. -172 с.

8. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: учеб. пособие для вузов / О.Д.Гольденберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко, С.П. Хелемская; под ред. О.Д. Гольденберга. – М.: Высшая школа, 2001. – 512 с.

9. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

10. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MatLab и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003.

Материал поступил в редакцию 03.03.09.

N.F. KARNAUKHOV, M.N. FILIMONOV, J.V. PUDOVA

DAMPING OF THE VIBRATIONS OF A GRIPPING DEVICE OF AN INDUSTRIAL ROBOT IN A REGIME OF A TWO CURRENTS DYNAMIC SLOWDOWN OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH FREQUENCY CONTROL

A method of reducing the amplitude of fluctuations in moving body of the industrial robot, gripping device in positioning mode. A feature of the method is to use two currents dynamic slowdown an asynchronous motor, running on a «autonomous voltage inverter - induction motor» in the frequency control. Program forming torque on the shaft of asynchronous motor through the mutual rotation vectors of the magnetic field of stator and rotor taking into account the amplitude and phase fluctuations in moving body of the industrial robot allow more accurate positioning gripping device in the performance of the transport and manufacturing operations.

КАРНАУХОВ Николай Федорович (р.1938), профессор кафедры «Робототехника и мехатроника» ДГТУ, кандидат технических наук (1984). Окончил Уральский электромеханический институт (1963).
Область научных интересов: электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов, полупроводниковые преобразователи частоты промышленных установок и устройств электрохимической защиты подземных металлических сооружений от коррозии.
Автор более 100 научных работ, 10 авторских свидетельств на изобретения и патенты РФ.

ФИЛИМОНОВ Максим Николаевич (р. 1976), старший преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника» ДГТУ. Окончил Донской государственный технический университет (1999).
Основная тематика научной деятельности: частотно-регулируемый электропривод мехатронных систем и технологического оборудования.
Автор более 16 научных работ. Имеет два авторских свидетельства на изобретения и патенты РФ.

ПУДОВА Юлия Владимировна, студентка 5-го курса факультета «Автоматизация, мехатроника, управление» ДГТУ.
Основное направление научной деятельности: разработка математических моделей частотно-регулируемого электропривода и их исследование.

E-mail: maxfil2006@yandex.ru.